

I nuovi superfluidificanti basati su Intelligent Cluster System (ICS) consentono di superare il paradosso della sostenibilità nel calcestruzzo

Master Builders Solutions Italia Spa

Autori

Nicoletta Zeminian è laureata in Chimica Industriale (Università di Padova) e ha conseguito un MBA (Heriot-Watt, Edimburgo). Ha operato per oltre 15 anni come ricercatrice nel dipartimento di ricerca e sviluppo di Degussa e BASF, concentrandosi sullo sviluppo di additivi chimici e tecnologie per il calcestruzzo. Responsabile settore marketing MCP per l'Europa dal 2013 al 2019. Dal 2020 Responsabile del settore marketing per calcestruzzo preconfezionato in Europa, e dal 2024 è Responsabile del Marketing Europa di Master Builders Solutions

Sandro Moro è Responsabile del settore tecnologia del calcestruzzo e innovazione dei materiali nel Team di Sviluppo Europeo di Master Builders Solutions Italia. Lavora nel campo delle miscele per calcestruzzo, raccogliendo esperienze nelle nuove tecnologie per materiali a base cementizia. Parte di vari comitati RILEM, ha conseguito la laurea specialistica in Scienze dei Materiali presso l'Università di Venezia, Venezia, Italia, nel 1999.

Alessandro Dalla Libera è Responsabile del settore Sviluppo Additivi per il Preconfezionato e Additivi per Cemento presso Master Builders Solutions Italia, 15 anni di carriera nella Ricerca e Sviluppo occupandosi di progettazione del prodotto e introduzione delle ultime innovazioni in Europa. Si è laureato in Chimica Industriale (Università di Padova) nel 2008.

ABSTRACT

Il settore delle costruzioni è attualmente in profonda trasformazione in risposta agli obiettivi di sostenibilità e al perseguimento della neutralità nelle emissioni di carbonio entro il 2050. Questo cambiamento è caratterizzato in particolare dall'introduzione di nuovi cementi a basso contenuto di clinker, supportati anche dal rilascio delle norme EN 197-5 e EN 197-6. I produttori di calcestruzzo stanno integrando questi cementi sostenibili nelle loro pratiche, ma affrontano sfide prestazionali, principalmente legate al mantenimento della lavorabilità, alle resistenze meccaniche a compressione, alla stabilità e alla robustezza della miscela. Un approccio comune per risolvere questi problemi comporta l'aumento del dosaggio di cemento e del contenuto di acqua. Tuttavia, questa soluzione spesso mina i benefici ambientali desiderati, portando ad un paradosso in cui la riduzione prevista delle emissioni di CO₂ viene annullata o, in alcuni casi, addirittura invertita con un aumento delle emissioni di CO₂. Questo lavoro presenta il potenziale della gamma MasterCO₂re, una serie di superfluidificanti basati sull'innovativa tecnologia Intelligent Cluster System (ICS). Ottimizzando strategicamente la lavorabilità, la reologia e la pompabilità in miscele di calcestruzzo contenenti cementi con basso contenuto di clinker, gli additivi MasterCO₂ consentono ai produttori di sfruttare appieno i vantaggi della riduzione dell'anidride carbonica associata ai nuovi cementi. Risolvendo così il paradosso della sostenibilità.

L'uso di questi additivi rivoluzionari spingono il settore delle costruzioni verso un futuro più sostenibile, allineando gli obiettivi ambientali con pratiche di produzione efficaci ed economicamente valide.

PAROLE CHIAVE

Neutralità, anidride carbonica, sostenibilità, Intelligent Cluster System, cementi a basso contenuto di clinker, reologia del calcestruzzo, pompabilità del calcestruzzo, additivi, MasterCO₂re.

INTRODUZIONE

L'urgenza di affrontare il cambiamento climatico e le sfide ambientali è enfatizzata a livello globale, con il Green Deal dell'UE che mira a rendere il continente neutrale dal punto di vista climatico entro il 2050. Il calcestruzzo, responsabile dell'8% delle emissioni globali di CO₂, richiede un'attenzione particolare, essendo un materiale da costruzione molto diffuso e la cui produzione è in continuo aumento. Sebbene le emissioni di CO₂ per m³ di calcestruzzo siano inferiori a quelle di altri materiali (1, 2), gli enormi volumi di calcestruzzo prodotti a livello globale, attualmente pari a 13,5 milioni di m³ e destinati a crescere, rendono l'impatto ambientale complessivo di questo materiale davvero notevole. Essenziale, per vincere la sfida della sostenibilità, è agire sul cemento, la componente del calcestruzzo che è responsabile della quota più significativa delle emissioni di CO₂. Come mostrato nella Figura 1, in 1 m³ di calcestruzzo, il cemento rappresenta solo circa il 10% ma è responsabile fino al 90% delle emissioni di CO₂. I dati sono solo a scopo illustrativo e si riferiscono a una composizione media di calcestruzzo preconfezionato con 300 kg/m³ di CEM II/A-LL e possono variare intorno a questo valore medio, a seconda della composizione della miscela. All'interno del cemento, il clinker è il componente principale e, oltre ad essere l'attore principale nell'idratazione del cemento e nello sviluppo delle resistenze, è anche il principale responsabile della CO₂ emessa nella produzione di cemento. Il clinker viene infatti prodotto bruciando materie prime naturali come calcare, argilla e marne a temperature molto elevate, un processo molto impattante in termini di emissioni di gas serra (3). L'industria del cemento si impegna a intraprendere azioni per raggiungere zero emissioni nette entro il 2050: CEMBUREAU prevede entro il 2030 di ridurre le emissioni di CO₂ del 30% per il cemento e del 40% lungo la catena di valore del calcestruzzo (4ell') e secondo la CEMBUREAU ROADMAP, questo sarà possibile principalmente con la tecnologia di cattura del carbonio (CCS-CCU). Fino a quando non sarà operativa questa tecnologia rivoluzionaria, sono raccomandate alcune azioni a breve e medio termine: combustibili alternativi, sostituzione del clinker, ottimizzazione delle miscele di calcestruzzo. Lungo queste linee e con questi obiettivi, l'industria del cemento sta attualmente vivendo una profonda trasformazione: i recenti standard per il cemento EN 197-5 2021 e EN 197-6 2023 (5,6), che hanno introdotto nuovi cementi, con contenuto di clinker ridotto come CEM II/C-M, CEM VI e CEM II/A-F e II/B-F, evidenziano questi cambiamenti. Di fatto, molti nuovi cementi sono stati introdotti in alcuni paesi europei negli ultimi due anni. Inoltre, si osserva anche uno spostamento all'interno dei cementi della EN197-1 del 2011, da quelli con alto contenuto di clinker tradizionalmente utilizzati a quelli con contenuto di clinker inferiore (7). Ad esempio, nel settore della prefabbricazione, il CEM I 52,5, che è stato il cemento più utilizzato fino a poco tempo fa, è ora in fase di eliminazione in diversi paesi, poiché i produttori di cemento puntano alla sua sostituzione con CEM II/A-LL 52,5, CEM II/A-LL, CEM III/A ecc. Nel calcestruzzo preconfezionato, il cemento tradizionalmente più utilizzato, ovvero il tipo II/A-LL 42,5, viene gradualmente sostituito con una varietà di cementi con un contenuto di clinker ridotto, ad esempio CEM II/B-LL, CEM II/B-M e CEM III/A ecc. La riduzione delle emissioni di CO₂ associata a queste modifiche del cemento è rilevante, come si può evincere dai dati nella Figura 2, calcolati grazie al database OneClick LCA che copre sia Ecoinvent 3.8 sia EPD verificate da diverse fonti. Sia i produttori di calcestruzzo preconfezionato che quelli di calcestruzzo prefabbricato devono convertire le loro produzioni ai nuovi cementi, ma spesso incontrano problemi di prestazioni, come una minore lavorabilità e pompabilità e uno sviluppo delle resistenze più lento.



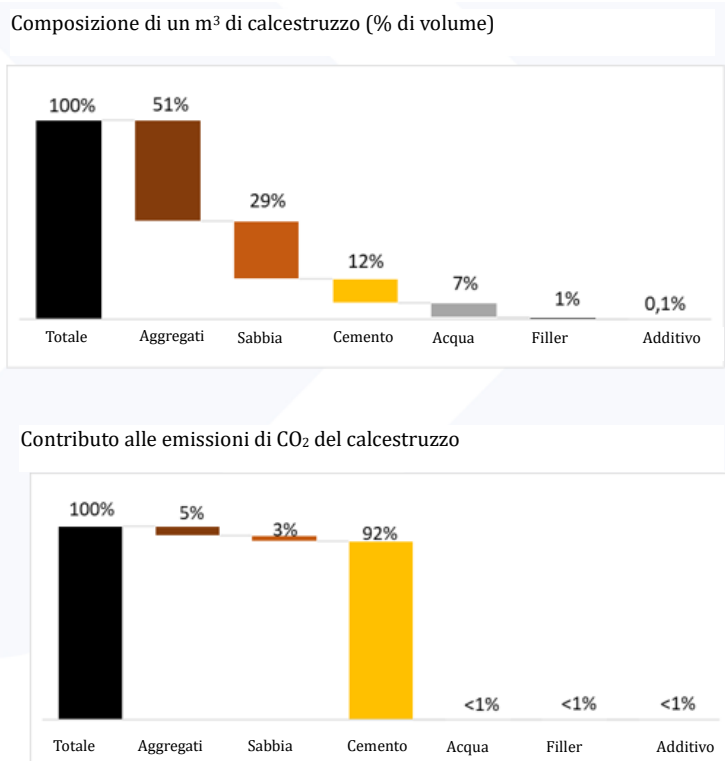


Figura 1: Contributo alle emissioni di CO₂ dei componenti del calcestruzzo

Cement	Kg CO ₂ eq/ton di cemento
CEM I	850
CEM II/A-S	710
CEM II/B-S	650
CEM II/A-D	540
CEM II/A-V	690
CEM II/B-V	610
CEM II/A-LL	740
CEM II/B-LL	680
CEM II/B-M	670
CEM II/C-M	400
CEM III/A	570
CEM III/B	420
CEM III/C	350
CEM V	500

Figura 2: Contributo alle emissioni di CO₂ di diverse tipologie di cemento

È una grande sfida, per l'industria del calcestruzzo, adattarsi al mutevole scenario e gestire la produzione giornaliera in modo concreto con i nuovi cementi, senza perdite di qualità e produttività. La trasformazione dell'edilizia richiede di ripensare processi familiari e di implementare soluzioni avanzate che consentano di stare al passo con il settore. Questo cambiamento richiede soluzioni innovative per mantenere la qualità del



calcestruzzo e affrontare l'impatto ambientale. I superfluidificanti sono stati tradizionalmente l'opzione migliore per sostituire il clinker (8, 9): consentendo la riduzione dell'acqua, permettono di produrre calcestruzzo con un rapporto acqua/cemento adeguato per ciascuna classe di resistenza e di durabilità, con quantità ridotte di cemento e acqua rispetto alla soluzione senza additivi. Negli ultimi decenni sono state sviluppate diverse tipologie di superfluidificanti, raggiungendo prestazioni notevoli. L'utilizzo dei superfluidificanti diventa al giorno d'oggi ancora più importante: nel mutevole scenario e con i nuovi cementi, sono necessarie soluzioni nuove e più avanzate per affrontare le sfide attuali. Master Builders Solutions ha risposto a queste esigenze con il lancio della gamma di superfluidificanti MasterCO₂re, basata sulla nuova tecnologia brevettata Intelligent Cluster System (ICS). Questa tecnologia affronta i limiti dei superfluidificanti tradizionali nella gestione dei cementi a basso clinker, consentendo di adottare pratiche sostenibili senza compromettere la qualità del calcestruzzo. Questo documento presenta il "paradosso del calcestruzzo" che può essere evitato grazie all'utilizzo di MasterCO₂re ed alla tecnologia ICS. Verrà spiegato il meccanismo d'azione ed illustrati i risultati di prove reologiche e di pompabilità condotte sul campo, evidenziando le prestazioni superiori di questa tecnologia.

IL PARADOSSO DEL CALCESTRUZZO

Le prove in calcestruzzo sono state eseguite con le miscele riportate in Figura 3, utilizzando un mescolatore planetario ad albero verticale (P50 da OMG SICOMA, 65Hz, 1950 rpm (Figura 4). La misura della consistenza (slump) è stata effettuata dopo 5, 30, 60 e 90 minuti secondo la norma EN 12350 parte 2.

Materie prima	Miscela 1	Miscela 2	Miscela 3	Miscela 4
CEM II/A-LL 42,5 (Kg/m ³)	307			
CEM II/B-LL 32,5 (Kg/m ³)		363	330	307
Sabbia naturale (Kg/m ³)	1121	1021	1050	1159
Ghiaia (Kg/m ³)	795	824	866	824
Acqua (L/m ³)	170	178	162	150
Superfluidificante tradizionale (Kg/m ³)	2,5	2,2		
MasterCO ₂ re (Kg/m ³)			2,2	3,1

Figure 3: Composizione della miscela di cemento



Figura 4: Mescolatore planetario

La Figura 5 riporta l'impatto della 4 miscele sulle emissioni di gas serra (GHG) e sul consumo di acqua. Il potenziale di riscaldamento globale totale (GWP tot) delle miscele è stato stimato con l'app ECO₂NOW™ di Master Builders Solutions, basata su raccolte di dati mondiali Ecoinvent 3.8 e EPD medi del settore, considerando l'approvvigionamento di materie prime (A1), il trasporto (A2) e la produzione (A3). (10). Qui è raffigurato il "paradosso del calcestruzzo": la miscela 1 e la miscela 2 rappresentano la produzione attuale dell'impianto di betonaggio coinvolto nelle prove, utilizzando un superfluidificante a base di policarbossilati. Il passaggio da CEM II/A-LL 42,5 (contenente fino all'80% di clinker) a CEM II/B-LL 32,5 (contenente fino al 65% di clinker) aveva lo scopo di impattare positivamente sulla sostenibilità; tuttavia, al fine di ottenere le prestazioni attese del calcestruzzo, il preconfezionatore si è trovato a dover aumentare il dosaggio di cemento e acqua nella Miscela 2, aumentando così di fatto le emissioni di CO₂ rispetto alla Miscela 1. E questo costituisce il paradosso.

La tecnologia di MasterCO₂re consente nella Miscela 3 e nella Miscela 4 un'ulteriore riduzione dell'acqua senza impatti negativi sulla reologia del calcestruzzo e sulla pompabilità. Le misure correttive come l'aumento del dosaggio di acqua e cemento della Miscela 2 possono quindi essere evitate e il paradosso viene risolto. 39 kg di CO₂ eq/m³ vengono risparmiati nella Miscela 4 rispetto alla Miscela 2. Il cemento con basso clinker di tipo II/B-LL 32.5 può essere utilizzato nel calcestruzzo senza diluire l'impatto positivo sulla sostenibilità e l'acqua può essere conservata anche nelle miscele 3 e 4 (Figura 5).

	Miscela 1	Miscela 2	Miscela 3	Miscela 4
Kg CO ₂ e/m ³ (Δ vs Mix 1)	259	263 (+1,4%)	239 (-7,9%)	224 (-13,7%)
Δ Acqua utilizzata vs Mix 1		+4,7%	-4,7%	-11,8%

Figure 5: Emissioni di CO₂ e consumo di acqua

Il mantenimento della lavorabilità, come riportato nella Figura 6, è notevolmente migliorato con l'utilizzo di MasterCO₂re. Ciò è dovuto ai Cluster Intelligenti, che consentono un rilascio del polimero nel tempo, come verrà descritto nel capitolo successivo. La resistenza a compressione misurata in provini cubici da 15x15x15cm in base alla norma UNI EN 12390 parte 2 e 3 è riportata in Figura 7; si evince che la riduzione del contenuto di cemento nella miscela di calcestruzzo a basso tenore di clinker non influisce sulla resistenza misurata: i valori della miscela 4 sono paragonabili a quelli della miscela 2. Il "paradosso del calcestruzzo" è quindi risolto: il nuovo cemento più sostenibile può essere utilizzato a parità di prestazioni meccaniche senza diluire il suo impatto positivo sulle emissioni di CO₂. La Figura 8 mostra l'aspetto del calcestruzzo subito dopo la miscelazione per le 4 miscele che sono state realizzate. L'aspetto del calcestruzzo nella Miscela 3 era visivamente molto simile alla Miscela 1 e alla Miscela 2. La Miscela 4 aveva un aspetto leggermente più coeso, ma ancora abbastanza buono, in considerazione della notevole riduzione di acqua.

Non trascurabile è l'importanza dei costi, quando si produce calcestruzzo. La Figura 9 mostra il costo del cemento dalle 4 miscele di calcestruzzo: oltre a non essere migliore in termini di emissioni di gas serra, la Miscela 2 era anche più costosa rispetto alla Miscela 1. D'altra parte, la Miscela 3 e la Miscela 4 con il nuovo superfluidificante, consentono anche un risparmio complessivo.



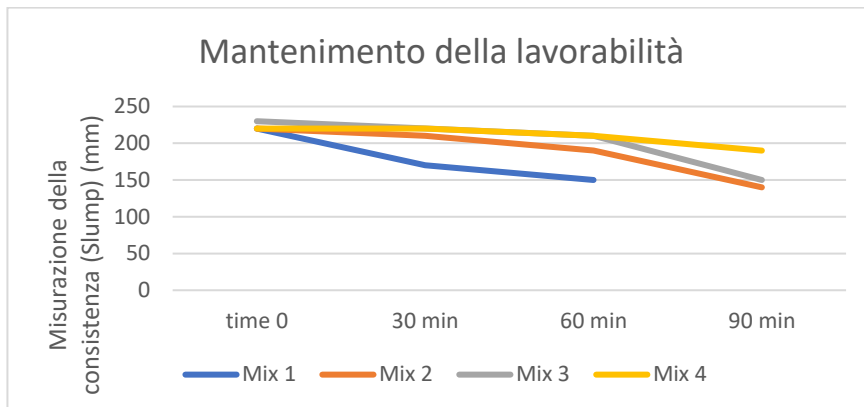


Figura 6: Mantenimento della lavorabilità

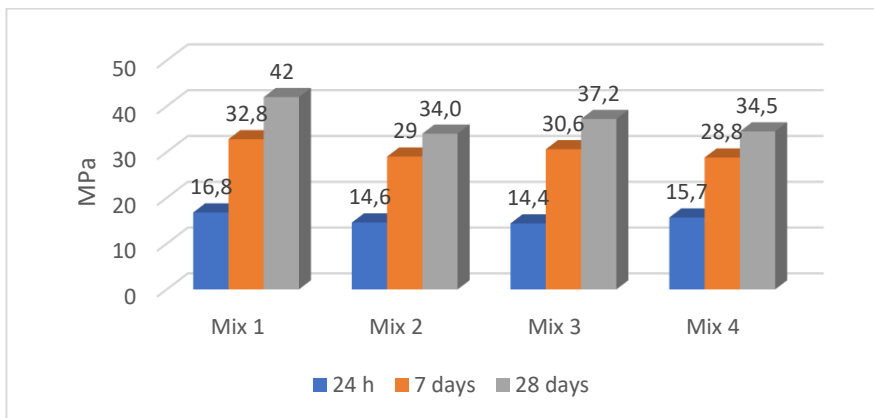


Figura 7: Resistenza a compressione



Figura 8: Aspetto del calcestruzzo

	Miscela 1	Miscela 2	Miscela 3	Miscela 4
Costo del cemento nel calcestruzzo (€/m ³)	43,0	47,2	42,9	39,9

Figura 9: costo del cemento nel calcestruzzo per 1 m³

LA TECNOLOGIA DELL'INTELLIGENT CLUSTER SYSTEM (ICS) – MECCANISMO D'AZIONE

L'Intelligent Cluster System si basa su una tecnologia unica sviluppata e brevettata da Master Builders Solutions che crea, in modo intelligente, cluster di strutture chimiche finemente calibrate, assicurando così il rilascio dei polimeri necessari nel calcestruzzo. MasterCO₂re è quindi composto da una parte di polimeri liberi, specificamente progettati per soddisfare i requisiti di prestazione iniziale, e dai cluster, che sono i componenti chiave di questa tecnologia rivoluzionaria. Generalmente, man mano che l'idratazione procede e si formano i cristalli idrati, i polimeri possono essere coperti dai cristalli stessi, perdendo così parzialmente il loro potere disperdente. Alcuni polycarbossilati sono progettati per avere un migliore mantenimento della lavorabilità; tuttavia, questo sta diventando sempre più difficile con i materiali cementizi di nuova generazione. Invece, quando MasterCO₂re con i suoi cluster vengono aggiunti al calcestruzzo, una parte dei polimeri è liberamente disponibile e fornisce la riduzione dell'acqua desiderata. A seguire, la variazione del pH e la dissoluzione delle specie ioniche nell'acqua dei pori innescano un rilascio controllato di molecole dal cluster, al procedere della dissoluzione del cemento. Mentre le molecole di additivi tradizionali vengono adsorbite dal cemento in modo piuttosto rapido, il sistema ICS controlla l'adsorbimento fornendo la giusta quantità di polimero superfluidificante necessaria alle condizioni chimiche e fisiche del calcestruzzo e garantisce così una lavorabilità nel tempo superiore.

L'effetto sulla reologia e la pompabilità. I polimeri senza cluster occupano un volume relativamente piccolo in una soluzione acquosa, ma con la tecnologia ICS, la stessa quantità di polimeri si distende all'interno della matrice, espandendo fino a circa 10 volte il volume occupato. La figura 10 non corrisponde esattamente alle reali dimensioni e proporzioni delle molecole e dei cluster, ma illustra questo concetto. La dimensione e l'ingombro sterico dei cluster consentono un ulteriore impulso al miglioramento della reologia: i cluster infatti forniscono una sorta di effetto tribologico/lubrificante tra i componenti del calcestruzzo e, soprattutto a bassi rapporti A/C, sono in grado di ridurre l'attrito garantendo così una migliore reologia del calcestruzzo (11). La figura 11, che descrive questo concetto solo in modo illustrativo, mostra come la viscosità del calcestruzzo sia inferiore al tempo zero e rimanga inferiore nel tempo grazie ad alcuni cluster che saranno sempre presenti per lubrificare il calcestruzzo, anche quando l'attrito tra le particelle di calcestruzzo aumenta con il procedere dell'idratazione del cemento e la crescita dei cristalli.

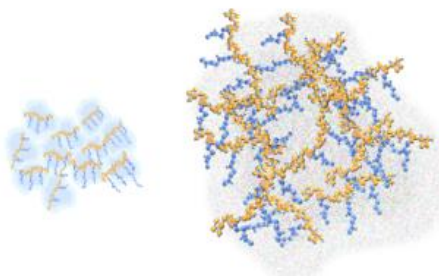


Figura 10. Polimeri senza cluster (a sinistra) e nel cluster (a destra)

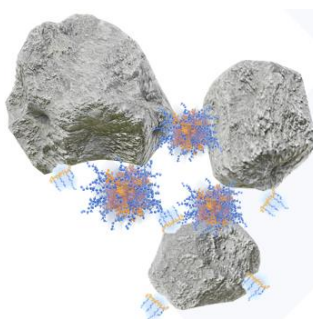


Figura 11. Effetto tribologico dei cluster tra le particelle solide nel calcestruzzo

La robustezza verso la «chimica» della matrice cementizia. La soluzione presente nei pori di una pasta cementizia può differire in termini di pH, natura chimica delle specie ioniche e loro quantità, a seconda della composizione chimica del cemento, A/C, temperatura e altri parametri. L'ICS, attraverso la distribuzione della dimensione dei cluster e le specifiche strutture polimeriche, fornisce un adsorbimento intelligente nel tempo, adattando il meccanismo di rilascio alle caratteristiche chimiche della matrice cementizia. L'ICS fornisce quindi una robustezza senza pari nei confronti delle diverse tipologie di cemento .

La robustezza. MasterCO₂re mostra robustezza sia verso la "chimica" che verso la "fisica" della matrice cementizia. L'ICS adatta il suo meccanismo di rilascio nel tempo, rispondendo alle diverse caratteristiche chimiche della matrice cementizia, fornendo una robustezza senza pari. Inoltre, la dimensione maggiore dei cluster ICS rispetto ai disperdenti standard garantisce la loro tendenza a rimanere fuori dalla porosità dei materiali cementizi supplementari, offrendo ulteriore protezione e robustezza del sistema.

Lo sviluppo delle resistenze meccaniche. Il rilascio controllato non ritarda, consentendo così un eccellente sviluppo iniziale delle resistenze a breve. Inoltre, il rilascio controllato consente una crescita più ordinata dei cristalli di idratazione e una minore porosità, con conseguente eccellente sviluppo delle resistenze a lungo termine del calcestruzzo. Gli studi eseguiti con diverse tecniche analitiche come il fisisorbimento/BET su paste idratate, l'analisi termogravimetrica, il microscopio elettronico a scansione e la diffrazione a raggi X, confermano un maggior grado di idratazione e una struttura più compatta.

PROVE DI REOLOGIA E POMPABILITÀ

È stato precedentemente dimostrato che la tecnologia MasterCO₂re e l'ICS può risolvere nella pratica il paradosso del calcestruzzo, evitando una diluizione dell'impatto delle emissioni di gas serra associate al passaggio a un cemento a basso contenuto di clinker. In questo capitolo verranno presentati i dati che mostrano il miglioramento della reologia e della pompabilità del calcestruzzo offerto da MasterCO₂re, che è alla base delle sue prestazioni. Le prove sul campo sono state effettuate presso un cantiere di Milano, relative alla costruzione di una torre di 20 piani alta oltre 100 metri. La temperatura ambientale durante i test era di 28° C. Il design della miscela è riportato in Figura 12. Nel corso di queste prove MasterCO₂re è stato confrontato con il livello più elevato di superfluidificanti tradizionali a base di polycarbossilati disponibili sul mercato.

	Quantità
CEM IV/A 42,5 R	450 kg/m ³
Sabbia	650 kg/m ³
Ghiaia	1063 kg/m ³
Acqua	175 kg/m ³
Rapporto acqua/cemento	0,39

Figure 12: Progettazione della miscela di calcestruzzo per le prove di reologia e pompabilità



La reologia del calcestruzzo è stata misurata con il reometro EBT-V dei sistemi di prova Schleibinger (Figura 13). La prova consiste nel misurare la coppia generata da una paletta rotante nel calcestruzzo. I valori registrati alle diverse velocità consentono di interpolare le proprietà reologiche attraverso il modello Reiner – Riwlin.



Figura 13: reometro eBT-V

La pompabilità del calcestruzzo è stata testata con il reometro a tubo scorrevole (SLIPER) di Schleibinger Geräte GmbH (Figura 14). Questo dispositivo di misurazione consente di valutare rapidamente le caratteristiche di pompaggio del calcestruzzo anche in cantiere. Lo SLIPER è costituito da un tubo verticale, con diametro di 125 mm, che viene riempito con calcestruzzo fresco (altezza di riempimento: 500 mm). Il tubo è montato su un basamento cilindrico di diametro leggermente inferiore che simula il pistone della pompa. Nella parte superiore del basamento è integrato un sensore di pressione. L'intervallo di pressione del dispositivo è di 1÷1500 mbar. Il tubo che contiene il calcestruzzo viene lasciato cadere anche applicando dei pesi e la sua velocità dipende dall'attrito che si crea tra il calcestruzzo ed il tubo stesso. Il sensore di pressione integrato misura la pressione generata dall'attrito che comprime il calcestruzzo. Viene inoltre registrata anche la velocità del tubo (intervallo di velocità del dispositivo: 0÷4 m/s). Tutti i dati raccolti vengono poi elaborati dal software, che rapporta la portata del calcestruzzo alla pressione della pompa da utilizzare considerando anche un'ipotetica distanza di pompaggio

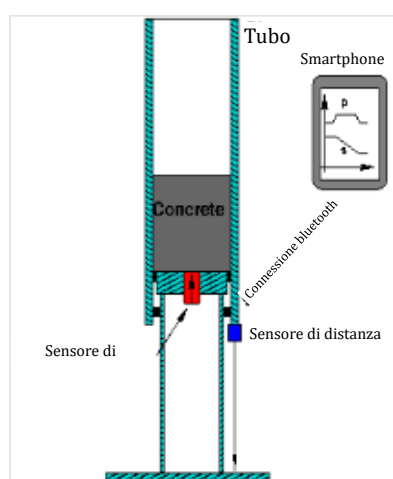


Figura 14: Reometro per tubi scorrevoli

La Figura 15 include una tabella sinottica dei risultati.

I risultati di resistenza sono, come previsto, simili nei tre test, che sono stati effettuati con lo stesso contenuto di cemento e acqua (Figura 16). Il mantenimento della lavorabilità è notevolmente migliorato dall'utilizzo di MasterCO₂re. La viscosità plastica, che è stata calcolata dall'interpolazione dei dati in Figura 17, nel test 2 è quasi dimezzata rispetto agli altri test, il che conferma l'effetto tribologico/lubrificante eseguito dai cluster, che riducono gli attriti tra le particelle solide nel calcestruzzo, garantendo così una migliore reologia soprattutto a bassi rapporti W/C. Pertanto, la viscosità del calcestruzzo è inferiore al tempo zero e rimane inferiore nel tempo poiché alcuni cluster saranno sempre presenti per lubrificare il calcestruzzo, anche quando l'attrito tra le particelle di calcestruzzo aumenta con il procedere dell'idratazione del cemento e la crescita dei cristalli idrati.

N. di test	Additivo	Dosaggio dell'additivo Kg/m ³	Densità del calcestruzzo (EN 12350-6) Kg/m ³	Prova di spandimento (EN 12350-2) (mm)			Sforzo di Taglio (Pa)	Viscosità plastica (Pa*sec)	Pressione di pompaggio misurata per un'altezza di 40 m (bar)
				tempo 0	tempo 30 minuti	Tempo 60 minuti			
1	Superfluidificante tradizionale	3,4	2372	650	--	--	33,2	47,9	36,0
2	MasterCO ₂ re	3,7	2400	670	620	620	38,9	26,3	30,0
3	Superfluidificante tradizionale per clima caldo	3,4	2378	580	--	600	41,3	46,2	--

Figure 15: Tabella sinottica dei risultati



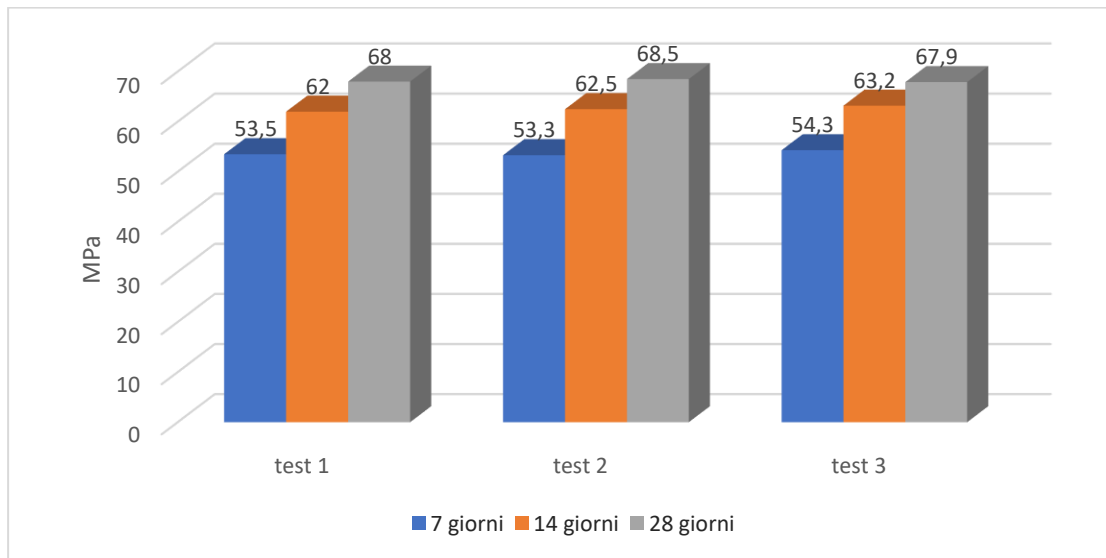


Figure 16: Risultati della resistenza alla compressione

La pressione di pompaggio utilizzata per pompare il calcestruzzo a 40 m di altezza, come previsto dai test con lo SLIPER è significativamente ridotta con il MasterCO₂re rispetto al superfluidificante tradizionale (da 36 fino a 30 bar). Il miglioramento della pompabilità del calcestruzzo è ulteriormente dimostrato nelle Figure 18, 19 e 20, che mostrano i risultati dell'analisi del software dello SLIPER impostando diverse lunghezze della linea di pompaggio, ovvero 50 m, 100 m e 200 m. In tutti i casi, la pressione necessaria per pompare il calcestruzzo contenente MasterCO₂re è significativamente inferiore a quella dei polycarbossilati tradizionali: con la nuova tecnologia, si forma un miglior effetto lubrificante che riduce lo sforzo di taglio all'interfaccia tra il calcestruzzo e la parete del tubo. Ciò riduce la pressione di pompaggio, il rischio di intasamento e garantisce una portata costante del calcestruzzo, contribuendo così a un funzionamento regolare e all'avanzamento normale del lavoro.

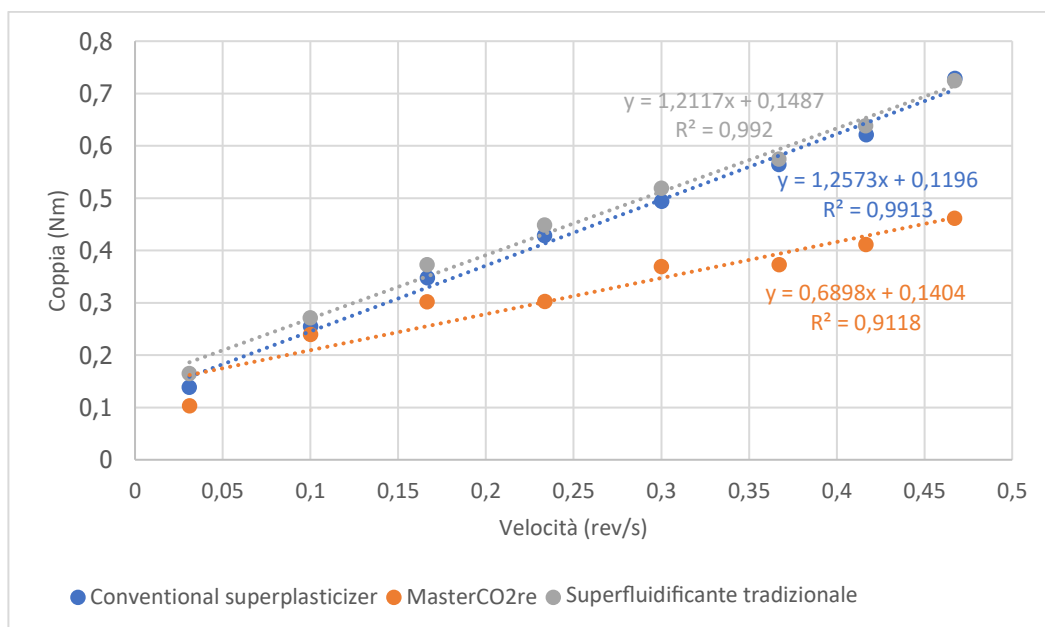


Figure 17: Elaborazione delle misure reologiche

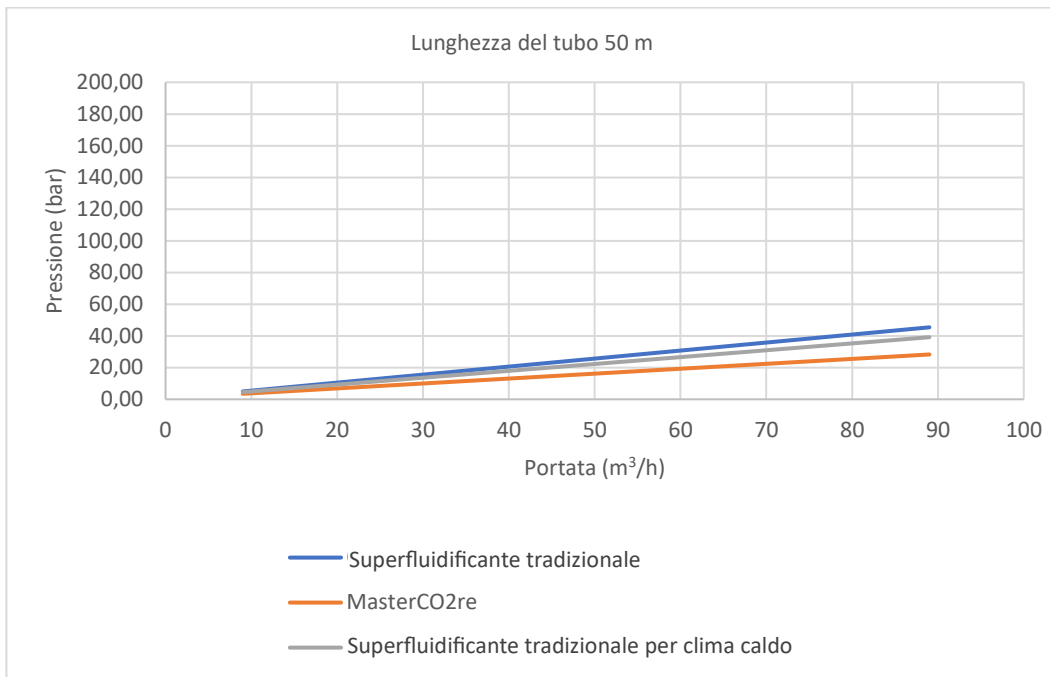


Figure 18: Elaborazione dati SLIPER con simulazione di tubo lungo 50m

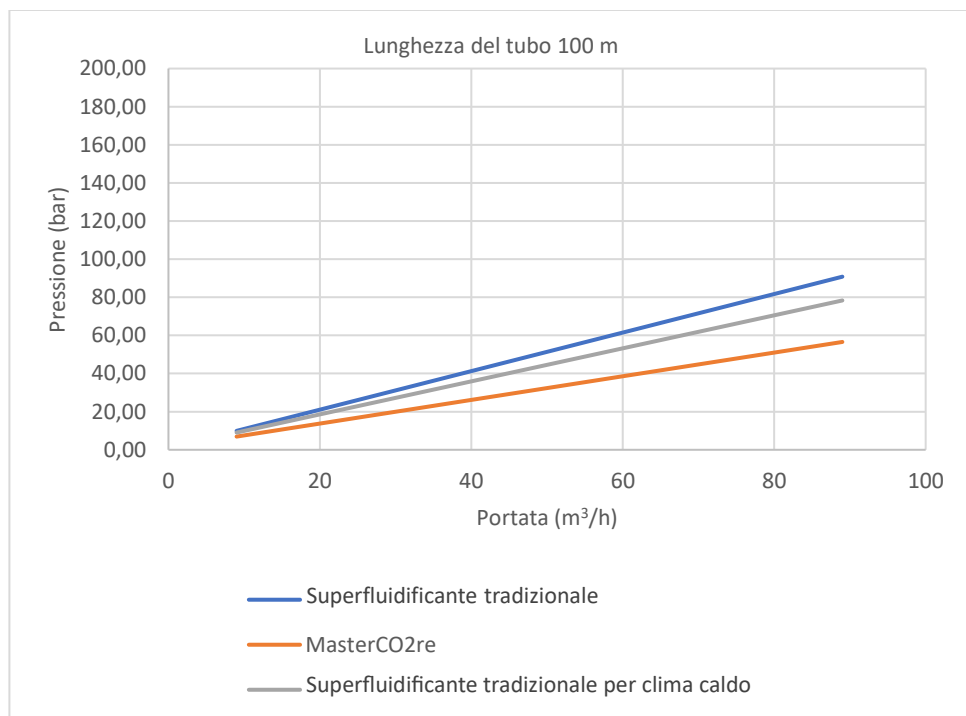


Figure 19: Elaborazione dati SLIPER con simulazione di tubo lungo 100m



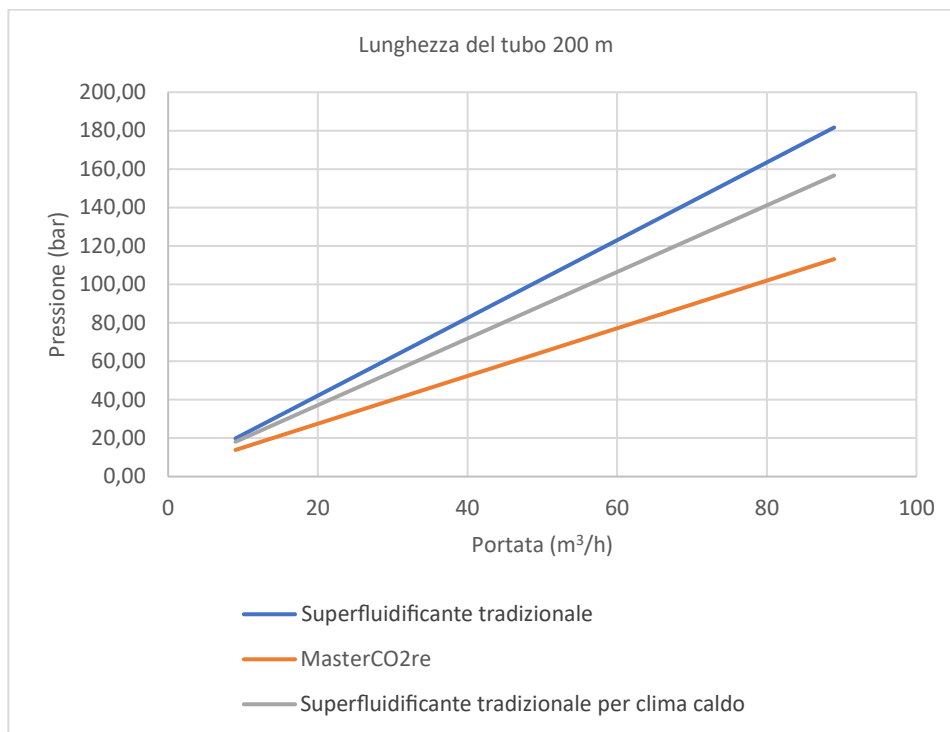


Figure 20: Elaborazione dati SLIPER con simulazione di tubo lungo 200m

CONCLUSIONI

Il settore delle costruzioni sta vivendo una profonda trasformazione guidata da obiettivi di sostenibilità e dall'imperativo di raggiungere la neutralità nelle emissioni di anidride carbonica entro il 2050. I produttori di calcestruzzo stanno affrontando molteplici sfide nell'integrazione dei nuovi cementi più sostenibili nella loro produzione quotidiana, a causa di problemi legati alla lavorabilità, alla resistenza meccanica, alla stabilità e alla robustezza della miscela. L'approccio tradizionale nell'affrontare queste sfide aumentando il dosaggio di cemento e il contenuto di acqua porta spesso ad un paradosso, in cui la riduzione prevista delle emissioni di CO₂ è compromessa o addirittura invertita, con conseguente effettivo aumento delle emissioni di CO₂. Ottimizzando strategicamente la lavorabilità, la reologia e la pompabilità in miscele di calcestruzzo a basso tenore di clinker, le miscele contenenti MasterCO₂re offrono una soluzione al paradosso della sostenibilità. I risultati dei test in calcestruzzo, integrati con i calcoli dell'impatto sulla sostenibilità eseguiti utilizzando l'app ECO₂NOW™ di Master Builders Solutions, dimostrano che la transizione ai cementi a basso clinker è fattibile senza compromettere la qualità e la redditività economica. Oltre a consentire una riduzione delle emissioni di CO₂, i prodotti MasterCO₂re contribuiscono al risparmio idrico, allineandosi alla necessità globale di conservazione dell'acqua. Le prove sul campo condotte in un cantiere di Milano, comprese le valutazioni reologiche e di pompabilità, hanno dimostrato l'efficacia di MasterCO₂re nel ridurre la pressione di pompaggio e la viscosità del calcestruzzo rispetto ai superfluidificanti tradizionali.

In conclusione, la linea MasterCO₂re con la tecnologia Intelligent Cluster System (ICS) si presenta come una soluzione rivoluzionaria per il settore delle costruzioni. Superando il paradosso della sostenibilità associato ai cementi a basso clinker, questi additivi contribuiscono in modo significativo a far progredire il settore verso un futuro più sostenibile. L'integrazione di MasterCO₂re consente ai produttori di calcestruzzo di raggiungere gli



obiettivi ambientali mantenendo la qualità del calcestruzzo, sostenendo così l'impegno del settore a raggiungere la neutralità del carbonio entro il 2050.

BIBLIOGRAFIA

1. BARCELO, Laurent & Kline, John & Walenta, Günther & Gartner, Ellis. (2014). Cement and carbon emissions. *Materials and Structures*. 47. 10.1617/s11527-013-0114-5
2. U.S. Geological Survey, Verein Deutscher Zementwerke; MBCC Group analysis
3. SCRIVENER, K., & John, V. M. (2010). Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. *Cement and Concrete Research*, 40(7), 1021-1037.
4. CEMBUREAU 2050 Roadmap
5. Commissione europea per la standardizzazione. EN 197-5:2011+A1:2021. Cemento - Parte 5: Cemento Portland composito CEM II/CM e cemento composito CEM VI (2021).
- 6 Commissione europea per la standardizzazione EN 197-6:2023. Cemento - Parte 6: Cemento con materiali da costruzione riciclati (2023).
7. Commissione europea per la standardizzazione EN 197-1:2011 Cemento – Parte 1: Composizione, specifiche e criteri di conformità per cementi comuni (2011).
8. Mindess, S., Young, J. F., & Darwin, D. (2003). *Concrete*. Prentice Hall.
9. RAMACHANDRAN, V.S. *Concrete Admixtures Handbook: Properties, Science, and Technology*, Noyes Publications (1995)
10. ECO²NOW App from Master Builders Solutions. <https://info.master-builders-solutions.com/it-it/eco2now-app>
11. MORATTI, F. and ZEMINIAN, N. *Concrete Engineering International*, Gennaio 2024, Volume 28, numero 1

RINGRAZIAMENTO

Il presente articolo è stato presentato al 52° Simposio dell'Institute of Concrete Technology, tenutosi presso Hillscourt Hotel, Birmingham l'11 Aprile 2024, dal titolo "Verso un calcestruzzo a zero emissioni: produrre calcestruzzo, non CO₂". Si ringrazia per la gentile concessione.

